

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

КОВАЛЕНКО ЮРІЙ ІВАНОВИЧ



УДК 621.9.048.7(043.3)

**ПІДВИЩЕННЯ ЯКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧНИХ
ЕЛЕМЕНТІВ КОМБІНОВАНОЮ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЮ
ОБРОБКОЮ**

05.03.07 – Процеси фізико-технічної обробки

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі фундаментальних дисциплін та прикладного матеріалознавства Черкаського державного технологічного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
Антонюк Віктор Степанович,
Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, м. Київ,
в. о. завідувача кафедри виробництва приладів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Хаскін Владислав Юрійович
Китайсько-український інститут зварювання ім. Є.О.
Патона, старший науковий співробітник

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Шатрава Олександр Павлович
Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН
України, старший науковий співробітник

Захист відбудеться „27” квітня 2021 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.15 при Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” 02000, м. Київ, вул. Політехнічна, 39, корпус 23, ауд. 216.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий “26” березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, доцент



Пащенко В.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним із пріоритетних напрямків подальшого розвитку науково-технічного та соціально-економічного стану держави є розробка та удосконалення оптичних приладів та систем різноманітного призначення. Особливе значення оптичні пристрої набули в галузях зв'язку та телекомунікацій, точного машино- та приладобудування, аерокосмічній галузі, при виробництві квантових обчислювальних пристроїв, у медицині тощо.

З поступовим зростанням вимог до тонких покриттів на оптичних матеріалах (висока адгезійна міцність тонкого покриття, висока корозійна стійкість, оптична однорідність) виникає необхідність у розробці нових та вдосконалені уже існуючих традиційних технологій, які б забезпечували необхідні властивості поверхні оптичних елементів.

Найпоширенішим матеріалом для виготовлення елементів цих пристроїв залишається оптичне скло, основними перевагами якого є дотримання стабільно високих оптичних характеристик в оптичному спектрі частот, хімічна та біологічна інертність, стійкість до екстремальних умов зовнішнього середовища, гарна механічна та термічна оброблюваність тощо.

В той же час, основними методами модифікування поверхні силікатного скла в оптичній промисловості залишаються механічне, хімічне, теплове оброблення, а також комбінація цих методів. Серед існуючих теплових методів поверхневого оброблення оптичного скла перспективним є метод стрічкового електронно-променевого оброблення, основними перевагами якого є висока точність та швидкість оброблення, широкий діапазон робочих режимів, здатність термічного та електронного впливу лише на поверхневий шар скла. При цьому можливе створення поверхні з новими фізико-хімічними та експлуатаційними властивостями. Сучасний рівень технічних досягнень в області поверхневого електронно-променевого оброблення оптичних матеріалів, тісно пов'язаний з роботами Ващенко В.А., Дудка Г.В., Лісоченка В.Д., Канашевича Г.В. та ін.

Разом з тим, питання досягнення високих характеристик якості оптичних елементів (стан поверхні, їх зносостійкість та оптичні властивості), особливо при їх експлуатації в екстремальних умовах (глибокого вакууму, критичних температур та тисків, підвищених рівнів вологості, забрудненості) на сьогоднішній час залишаються не вирішеними.

Іншим не розкритим технічним питанням залишається необхідність гнучкого контролю та регулювання енергетичними параметрами електронно-променевого оброблення безпосередньо під час проведення технологічного циклу. Це дозволило б за зміною розподілу електричних та теплових полів корегувати вплив електронного потоку на модифіковану поверхню.

Таким чином, підвищення якісних характеристик оптичних елементів шляхом розробки нового та удосконалення існуючого методичного, математичного, програмного забезпечення, модернізації базового технологічного обладнання (поєднання резистивного методу осадження тонких покриттів і електронно-променевого оброблення в одному технологічному циклі), що в цілому представляє собою комбіновану технологію електронно-променевого оброблення є важливою і актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася в Черкаському державному технологічному університеті на кафедрі фундаментальних дисциплін та прикладного матеріалознавства та пов'язана з тематикою науково-дослідних робіт: “ Технологічні основи отримання металізованих покриттів на виробх мікрооптики і наноелектроніки електронно-променевим методом” (номер державної реєстрації 0103U003689), “ Діагностика функціональних шарів у виробх мікрооптики і наноелектроніки, отриманих електронними технологіями” (номер державної реєстрації 0106U004500), “Технологічні основи електронної нанообробки поверхонь виробів із п'єзоелектричних керамік” (номер державної реєстрації 0109U002738), “Отримання та дослідження зносостійких покриттів на поверхнях оптичних виробів спеціального призначення комбінованим методом термічного випаровування ” (номер державної реєстрації 0110U000852), “Технологічні основи отримання впорядкованих наноструктур на поверхнях зондів для атомно-силової мікроскопії” (номер державної реєстрації 0111U002932), “Технологічні основи створення теплоізоляційних нанорозмірних оксидних покриттів на поверхнях оптичних діелектриків комбінованим термовакuumним осадженням” (номер державної реєстрації 0112U001701).

Мета і задачі дослідження. Мета роботи полягає в підвищенні якісних характеристик оптичних елементів (зменшенні кількості макро- та мікродофектів поверхні, залишкової шорсткості поверхні, підвищенні їх механічної міцності) внаслідок поєднання технології отримання тонких покриттів на їх поверхнях та гнучкого керування процесом електронно-променевого оброблення в одному технологічному циклі.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі основні задачі:

1. На основі аналізу літературних джерел визначити фактори, які впливають на стан поверхні та якісні характеристики оптичних елементів і обґрунтувати наукові задачі підвищення якості оптичних елементів комбінованим електронно-променевим обробленням.

2. Запропонувати комплекс методик по проведенню керованого комбінованого електронно-променевого оброблення, дослідженню якості підготовки та модифікування оптичних елементів, отриманих із застосуванням такого оброблення.

3. Розробити математичну модель теплового впливу електронного потоку на поверхню оптичного елементу.

4. Встановити закономірності впливу робочих параметрів електронно-променевої гармати Пірса (напруги на модуляторі, прискорюючої напруги, струму розжарення) на енергетичні параметри електронного потоку

5. Здійснити модернізацію базового технологічного обладнання для проведення на його основі комбінованого електронно-променевого оброблення в одному циклі, визначити раціональні режими такого оброблення.

6. Провести експериментальні дослідження з визначення якісних характеристик оптичних елементів отриманих комбінованим електронно-променевим обробленням.

Об'єкт дослідження – явища та процеси, що виникають при комбінованому електронно-променевому обробленні поверхневих шарів оптичних матеріалів.

Предмет дослідження – метод, моделі та засоби комбінованого електронно-променевого оброблення поверхонь оптичних елементів.

Методи дослідження. Для вирішення завдань дисертаційної роботи застосовувалися сучасні методи теоретичних досліджень, в основі яких лежать положення теорій: теплопровідності, термічної емісії електронів, взаємодії заряджених частинок з речовиною.

Експериментальні дослідження впливу електронно-променевого оброблення на якісні характеристики поверхонь оптичних елементів проводилися з використанням оптичної інтерферометрії, скануючої атомно-силової мікроскопії (АСМ), а також методів математичної статистики для оброблення експериментальних даних.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Удосконалено математичну модель енергетичного впливу стрічкового електронного потоку на поверхню оптичного матеріалу з покриттям, що враховує отримані в реальному часі геометричні та енергетичні параметри електронного потоку і за допомогою, якої оперативно визначається розподіл теплових полів в оптичному елементі.

2. Встановлено закономірності впливу робочих параметрів електронно-променевої гармати Пірса (напруга на модуляторі, прискорююча напруга, струм розжарення) на енергетичні параметри електронного потоку (коефіцієнт ефективності, розподіл щільності електронного потоку), що дозволило підвищити стабільність електронного потоку і як наслідок якісні характеристики оптичних елементів.

3. Запропоновано новий метод керованого комбінованого електронно-променевого оброблення оптичних елементів, який, на відміну від відомих, дозволяє здійснювати контроль енергетичних параметрів електронного потоку в процесі проведення технологічного експерименту, що впливають на якісні характеристики оптичних елементів та дозволяє оперативно і в режимі реального часу проводити автоматичне корегування робочих режимів електронного потоку безпосередньо в процесі такого оброблення.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дисертаційного дослідження вирішують важливе науково-прикладне питання підвищення якісних характеристик оптичних елементів шляхом розроблення та упровадження нового методичного, математичного, технічного та програмного забезпечення, що в цілому представляє собою комбіновану технологію електронно-променевого оброблення. Практична цінність отриманих результатів полягає в наступному:

1. Створено та програмно реалізовано математичну модель, що дозволяє з високою точністю і в режимі реального часу визначати розподіл теплових полів по поверхні оптичного елементу.

2. Вдосконалено вакуумне обладнання в частині автоматизації технологічного комбінованого електронно-променевого оброблення, що дозволяє здійснювати високопродуктивне та якісне оброблення оптичних елементів в одному технологічному циклі.

3. Розроблено автоматизовану систему керування комбінованим електронно-променевим обробленням, яка дозволяє безпосередньо в режимі

робочого циклу гнучко регулювати енергетичні параметри стрічкового електронного потоку, що призводить до підвищення точності та повторюваності результатів технологічного експерименту.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, математичні моделі знайшли практичне використання та впровадження (підтверджено актами впровадження) на підприємствах України (ПМПП «Фотоніка Плюс», ПрАТ «Укрп'єзо», ТОВ НВФ "ОНТФ" , (м. Черкаси), а також за кордоном (ТДВ "Микротестмашины" (м. Гомель, Білорусь)).

Основні положення дисертації використані в навчальних курсах Черкаського державного технологічного університету з дисциплін «Теоретичні основи теплотехніки», «Основи математичного моделювання систем», «Основи теплотехніки».

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є науковою працею автора, який самостійно застосовував комплекс методичних підходів, здійснював математичне моделювання та експериментальні дослідження і аналіз одержаних даних, сформулював висновки і рекомендації за результатами роботи. Так, автором проаналізовано основні негативні фактори, що впливають на якісні характеристики елементів оптичних пристроїв та систем, а також вимоги, які висуваються до цих елементів. Вдосконалено експериментальні методики та модернізовано окремі вузли обладнання для комбінованого електронно-променевого оброблення(КЕПО) оптичних елементів. Проведене чисельне моделювання теплового впливу електронного потоку стрічкової форми на оптичну поверхню. Надано рекомендації щодо дотримання раціональних режимів КЕПО, а також проведено впровадження результатів розробок та досліджень на вітчизняних та закордонних підприємствах України і в навчальний процес.

Апробація результатів дисертації. Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати досліджень доповідалися на міжнародних наукових конференціях: „Електронная микроскопия” (м. Чорноголовка 2012р.р.), "Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии" (м. Мінськ, 2006, 2010 р.р.), "Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях" (сел. Славське, Львівської обл., 2007, 2010 р.р.), "Приладобудування: стан і перспективи" (м. Київ, 2013 р.), "Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте" (м. Свалява – м. Київ, 2014 р.), "Инженерия поверхности и реновация изделий" (м. Ялта – Київ, 2013 р.), " Physics and technology of thin films and nanosystems: XIV Intern. conf." (м. Івано-Франківськ, 2013 р.), "Современные проблемы физики конденсированного состояния, нанотехнологий и наноматериалов" (м. Алмати, 2014 р.), "Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении" (м. Одеса, 2018 р.), “Перспективи розвитку машинобудування та транспорту”; (м. Вінниця, 2019 р.), “ Процеси механічної обробки, верстати та інструмент ”; (м. Житомир, 2019 р.).

Публікації. За темою дисертацій опубліковано 30 наукових праць, з них 1 монографія, 10 статей у фахових виданнях (2 в іноземних виданнях, що індексуються в Scopus), 2 патенти України на корисну модель, 4 статті у інших виданнях, 13 публікацій матеріали конференцій.

Структура і об'єм дисертації. Дисертація складається з анотації, змісту, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить 181 сторінку, і містить 68 рисунків, 3 таблиці, список використаних джерел складає 170 найменувань і займає 21 сторінку, а також 6 додатків на 24 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкрито суть та стан наукової проблеми, обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання досліджень, наведені дані щодо наукової новизни, обґрунтована достовірність та показана практична цінність отриманих наукових результатів. Наведені відомості про апробацію результатів роботи та кількість публікацій за темою дисертації.

У першому розділі проведено аналіз сучасних методів модифікування поверхонь оптичних елементів. Встановлено основні фактори, які впливають на процес формування та якості отриманих тонких плівок на оптичних поверхнях. Проаналізовані сучасні методи поверхневого нанесення тонких покриттів на оптичні поверхні та подальшого їх модифікування. Надано увагу розгляду та аналізу сучасним методам поверхневого модифікування оптичних поверхонь з використанням концентрованих потоків енергії. В якості найбільш перспективних методів обрано метод резистивного осадження тонких плівок та метод стрічкової електронно-променевої обробки. Комбіноване застосування цих методів дозволить знизити шорсткість поверхні оптичних елементів, чим підвищить техніко-експлуатаційні характеристики оптичних приладів. Розглянуто методи та засоби формування, керування та діагностування параметрів електронного потоку.

Другий розділ присвячений розробці комплексу методик: по проведенню керуваної КЕПО, дослідженню якісних характеристик модифікованих оптичних елементів та визначенню розподілу густини струму в електронному потоці, опису модернізованого технологічного обладнання для КЕПО оптичних елементів. В якості об'єктів, для дослідних обрані металеві покриття (Al, Ag, Au) товщиною менше 1 мкм, які осаджувалися на поверхню пластин з оптичного скла марок К8(Ø20, 30, 40×2, 4, 6мм), ТК14(20×20×1,5 мм).

Основне завдання при розробці методичного комплексу експериментальних досліджень полягало в удосконаленні відомих та розробці нових авторських методик, очікувані результати яких наведені в табл.1.

Застосування цих методик з дослідження якісних характеристик оптичних елементів дозволяє дотримуватися сучасних вимог, які висуваються до поверхонь оптичних виробів Міжнародним стандартом ISO 10110-1/14

Модернізована установка для КЕПО (поєднання в одному технологічному циклі ЕПО та резистивного осадження тонких плівок) оптичних елементів створена на базі промислової універсальної вакуумної установки УВН-71-П і включає спеціальне технологічне оснащення, як вдосконалене (електронну гармату Пірса, що формує електронний потік стрічкової форми, резистивний випарник, електронний випарник, механізм переміщення оптичних пластин, кварцові нагрівачі для попереднього нагріву і завершального охолодження, високовольтне джерело живлення), так і унікальне – розроблене автором (систему зондування електронного

потоків та автоматизовану систему гнучкого керування режимами електронно-променевого оброблення) рис. 1.

Таблиця 1. Склад комплексу наукових методик, що розроблені в дисертаційній роботі

Назва методики	Очікуваний результат від застосування методики
Методика модифікування поверхонь оптичних матеріалів КЕПО	Визначає технологічну послідовність операцій при КЕПО оптичних елементів для отримання високоякісних поверхонь
Методика по визначенню розподілу густини струму в електронному потоці	Дозволяє оперативно визначати просторово-енергетичні характеристики параметрів стрічкового електронного потоку безпосередньо в процесі ЕПО при різних технологічних параметрах електронно-променевої гармати Пірса
Методика оцінки якості поверхні оптичних елементів методом атомно-силової мікроскопії	Визначає якість поверхні оптичних елементів, та дозволяє встановити раціональні технологічні режими, що забезпечують мінімальну шорсткість обробленої поверхні

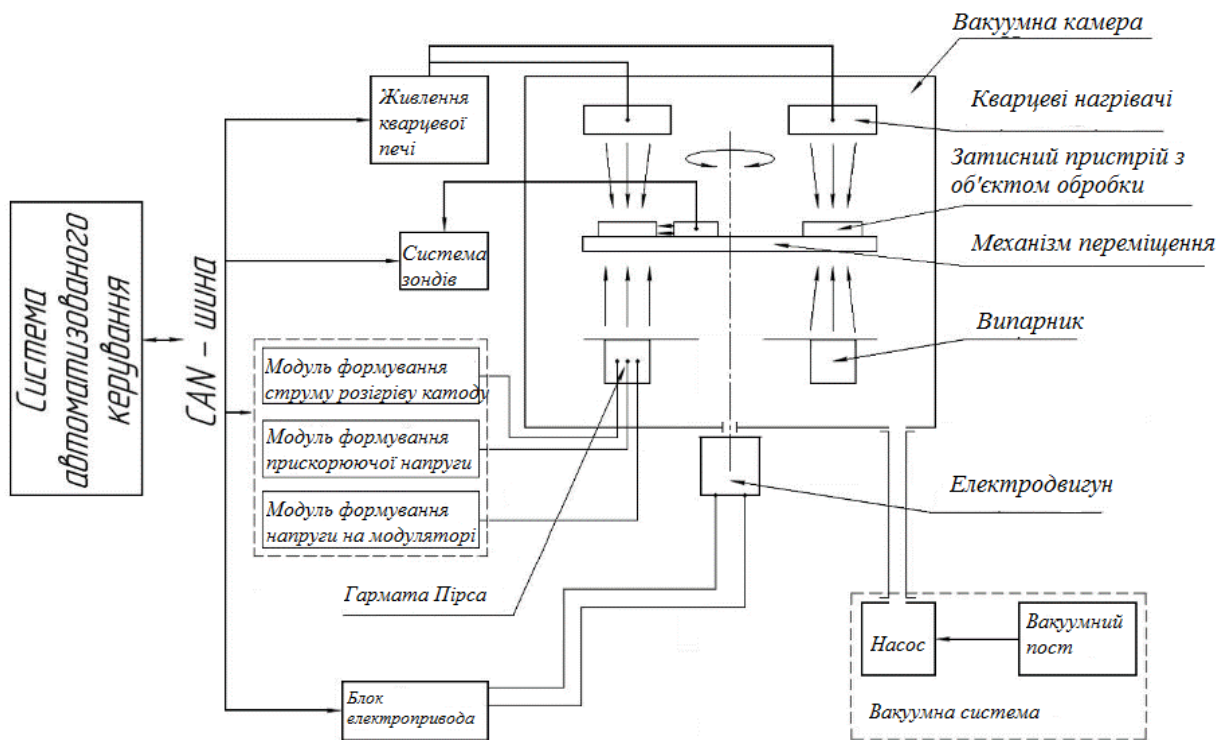
Основні технологічні характеристики модернізованої установки: мінімальний залишковий тиск у вакуумній камері $p_0 = 5 \cdot 10^{-4}$ Па, температура попереднього нагріву (300...1100) ± 3 К, швидкість обробки 0,5...8 см/с $\pm 1\%$, точність позиціонування зразка в зоні обробки ± 5 мкм, прискорююча напруга $U_{np} = 0...6$ кВ $\pm 1\%$, напруга на модуляторі $U_{mod} = 0...65$ В $\pm 1\%$, струм розжарення катода $I_k = 0...30$ А $\pm 5\%$, струм електронного потоку $I_{nom} = 50...400$ мА $\pm 5\%$, струм розігріву випарника, $I_B = 30...400$ А $\pm 5\%$.

Для технічної реалізації процесу підвищення ефективності електронної обробки за участі автора розроблена автоматизована система гнучкого керування режимами роботи КЕПО, яка дозволяє безпосередньо в процесі робочого циклу керувати питомою потужністю, що призводить до підвищення точності та повторюваності результатів технологічного експерименту.

Розроблена система зондування низькоенергетичного електронного потоку стрічкової форми дозволяє у режимі реального часу визначати та корегувати енергетичні параметри електронного потоку (коефіцієнт ефективності, розподіл щільності електронного потоку) шляхом зміни робочих параметрів електронно-променевої гармати Пірса (напруга на модуляторі, прискорююча напруга, струм розжарення), що гарантовано підвищує стабільність електронного потоку і, як наслідок, якісні характеристики оптичних елементів. Основні функції, що забезпечуються такою системою: автоматична зміна і стабілізація параметрів електронної гармати, моніторинг аварійних станів, проведення вимірювання зондового струму (рис. 2.).

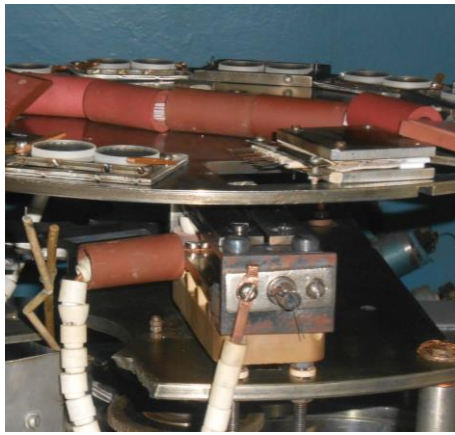


(a)

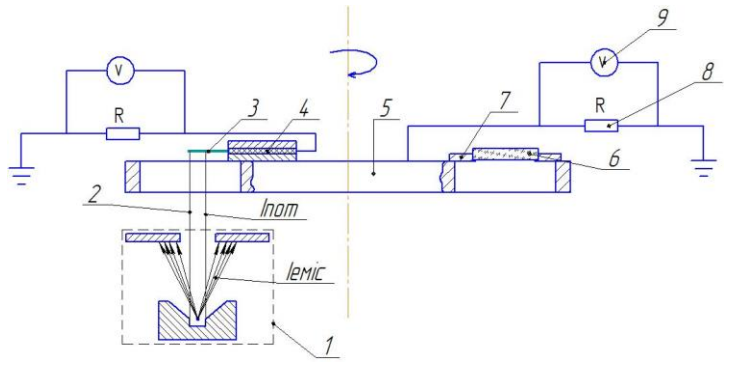


(б)

Рис. 1. Зовнішній вигляд (а) та структурна схема (б) модифікованої установки для КЕПО оптичних елементів: 1 – вакуумна камера; 2 – блок живлення електронного випарника УЭЛИ-1; 3 – блок живлення резистивного випарника; 4 – блок живлення електронно-променевої гармати Пірса “Statron”; 5 – терморегулятор-термозадатчик РИФ-101; 6 – вакуумний пост установки УВН-71-П; 7 – блок живлення та керування електроприводом механізму переміщення; 8 – пристрій зондування електронного потоку; 9 – ПЕОМ для контролю та керування технологічними параметрами електронно-променевого оброблення.



(а)



(б)

Рис. 2. Зовнішній вигляд та структурна схема зондування електронного потоку стрічкової форми : 1 – модуль електронної гармати Пірса, 2 – стрічковий електронний потік, 3 – вольфрамові зонди, 4 – керамічний ізолятор, 5 – обертовий пристрій для переміщення виробів; 6 – оптичний виріб; 7 – утримувач підкладинок; 8 – шунтуючий резистор; 9 – вольтметр.

Підтвердження отримуваних результатів технологічного експерименту з підвищення якісних характеристик оптичних елементів методом КЕПО проводилося з використанням сучасних аналітичних методів та обладнання (визначення відхилення профілю контрольованої поверхні оптичного елемента від її теоретичного профілю – метод оптичної інтерферометрії; визначення та контроль розподілу залишкової мікрошорсткості поверхні оптичного елемента та адгезійної міцності покриттів – метод атомно-силової мікроскопії).

Таким чином, модернізоване технологічне вакуумне обладнання та запропонований комплекс методик по дослідженню якісних характеристик оптичних елементів дозволяють здійснювати високопродуктивну та якісну КЕПО оптичних елементів в одному технологічному циклі.

В третьому розділі представлено результати розрахунку електростатичного поля та траєкторії руху електронів ЕПГ Пірса з урахуванням об'ємного заряду та початкової швидкості. Проведено дослідження з визначення впливу потенціалу модулятора на форму електронного потоку.

Для проведення розрахунків з визначення електростатичного поля, були встановлені умови однозначності моделі:

теорема Гауса для електростатичних полів у вакуумі $\nabla \cdot E = \rho / \epsilon_0$, $E = -\nabla U$ (1)

– умова збереження заряду (нульовий заряд існує на границі області моделювання тому $n \cdot D = 0$) $E = -\nabla U$, $\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r E) = \rho_V$ (2)

– густина просторового заряду $\nabla \cdot D = \rho_U$ (3)

– потенціали електродів (гранична умова $U = U_0$), $U_{пр} = 1-5$ кВ, $U_m = 0-65$ В, для анода та підкладинки $U = 0$ В.

Для обчислення траєкторій руху електронів в сформованому електронному потоці визначено наступні умови однозначності моделі:

$$\text{механічна складова сили: } F = \frac{d(m_e v)}{dt} \quad (4)$$

($m_e v$, e – імпульс та заряд електрона, відповідно).

електрична складова сила Лоренца: $F = eZ(-\nabla U) = eZE$ (5)

Z – це кількість частинок, ∇U – градієнт потенціалу електричного поля, E – напруженість електричного поля; кількість частинок в зоні моделювання: заряд $q = eZ$, початкова швидкість $v = v_0$; електрони рівномірно емітуються з катоду циліндричної форми діаметром 0,4 мм.

Опис руху потоків електронів, які рівномірно емітуються з поверхні вольфрамового катоду, має враховувати початкову швидкість електронів з поверхні катода. До основних проблем відносять неможливість врахування напрямку та швидкості електронів.

Задача з урахуванням просторового заряду вирішується для полів та частинок одночасно. Ефект просторового заряду в електронному потоці (поле чинить вплив на частинки, а просторовий заряд впливає на поле):

$$-\nabla \cdot \epsilon_0 \nabla U = \sum_{i=1}^N eZ \delta(r - q_i) \quad (6) \quad \frac{d(m_e v)}{dt} = eZ(-\nabla U) \quad (7)$$

де δ – дельта функція Дірака;

Вплив кожної частинки в моделі на щільність просторового заряду пучка визначається за формулою: $\frac{d\rho}{dt} = eZ \sum_{i=1}^N f_{rel} \delta(r - q_i)$ (8)

f_{rel} – кількість частинок, які емітуються з поверхні катоду за секунду.

Для усунення проблем які пов'язані з невеликою величиною точкового заряду щільність просторового заряду рівномірно розподіляється по кожному елементу сітки.

Результати розрахунку електричного поля у вигляді екіпотенціальних ліній та ліній напруженості електричного поля отримані за допомогою математичної моделі представлені на рис. 3. В результаті використання в ЕПГ Пірса катода з круглим перерізом траєкторії електронів у проміжку катод-анод є не паралельні в порівнянні з класичною електронно-оптичною системою. Тому частина електронів потрапляє на поверхню аноду, таким чином енергія яка використовується для розгону електронів витрачається на нагрівання аноду. Тому для підвищення ефективності (відношення струму електронного потоку, що потрапляє на зразок до повного струму електронного потоку), здійснюється керування напругою на модуляторі, яке дасть змогу підвищити ефективність електронного потоку та змінити його форму (рис.4.). Як видно з представлених розрахунків регулювання електронним потоком за допомогою потенціалу модулятора дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії електронної гармати. Однак збільшення потенціалу модулятора призводить до зменшення ефективної площі катода, тобто для підтримання струму емісії необхідно збільшувати струм розжарення катода, що в свою чергу зменшує термін його служби.

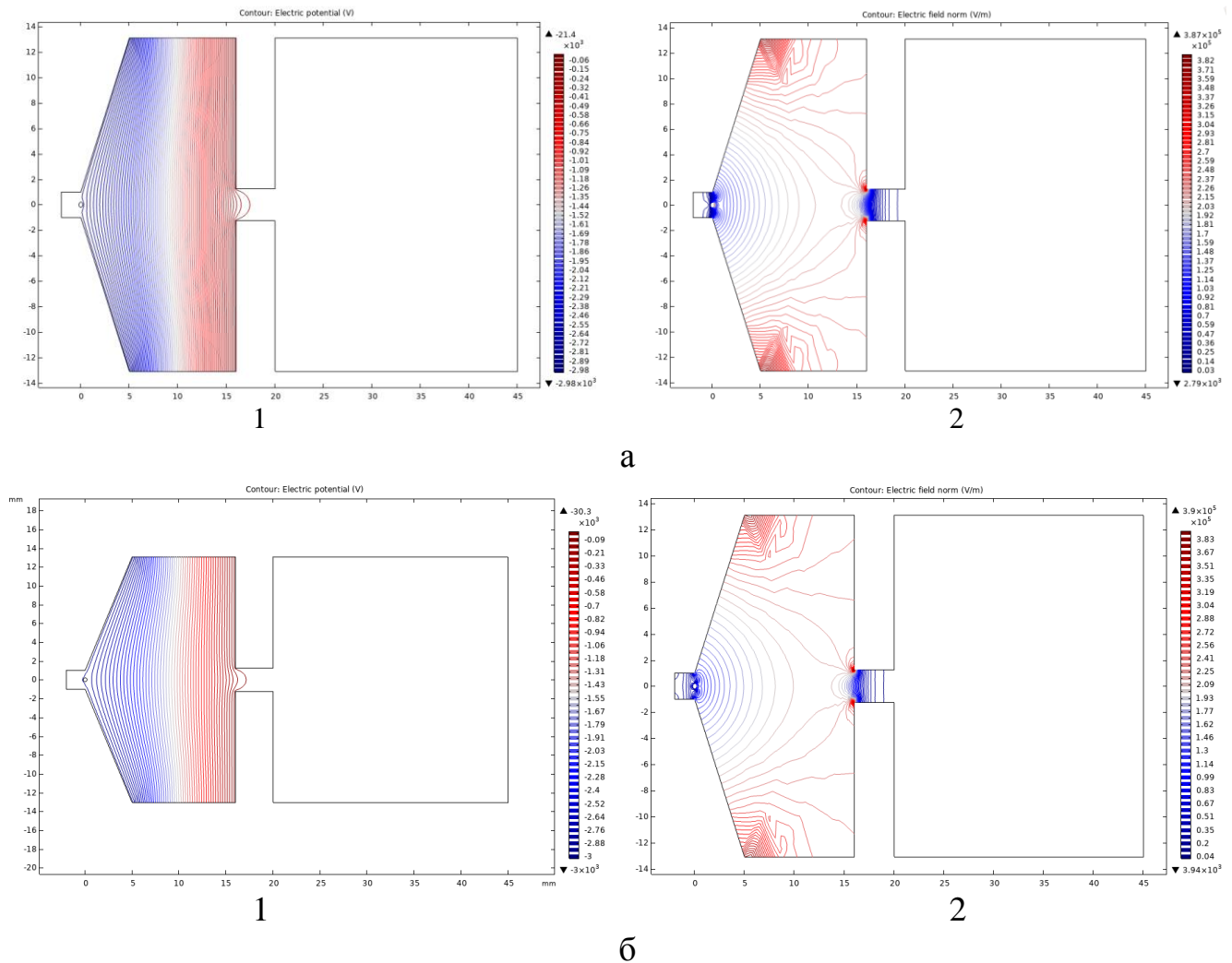


Рис. 3. Результат розрахунку електростатичного поля в електронній гарматі Пірса при $I_{\text{роз.}}=12,5 \text{ A}$, $U_{\text{пр}}=3 \text{ кВ}$, $I_{\text{пот}}=210 \text{ мА}$, $U_{\text{мод}}=0 \text{ В}$ (а), $U_{\text{мод}}=35 \text{ В}$ (б): екіпотенціальні лінії електростатичного поля між катодом та анодом ЕПГ, В (1) та лінії напруженості електростатичного поля В/м (2)

В результаті проведеного зондування низькоенергетичного електронного потоку стрічкової форми було встановлено, що при різних параметрах ЕПГ Пірса на практиці спостерігаються різні закони розподілу густини струму, які є відмінними від гаусівського розподілення (рис.5). Це пов'язано з відмінностями конструкції електронно-променевої гармати від ідеальної оптики Пірса. В ЕПГ прискорююче поле максимальне в центрі модулятора і знижується до його країв. Тому катод навантажений нерівномірно і найбільший добір струму відбувається з його центральної ділянки. При зміні напруги на модуляторі струм пучка також зазнає змін по величині, за рахунок зміни просторового заряду на катоді, при цьому змінюється величина ділянки катода. Тому зміна $U_{\text{м}}$ призводить до зміни робочої поверхні катоду і відповідно до зміни струму променя. Зондування електронного потоку в процесі КЕПО дасть можливість контролювати та управляти параметрами електронного потоку, що призведе до підвищення якості КЕПО оптичних елементів.

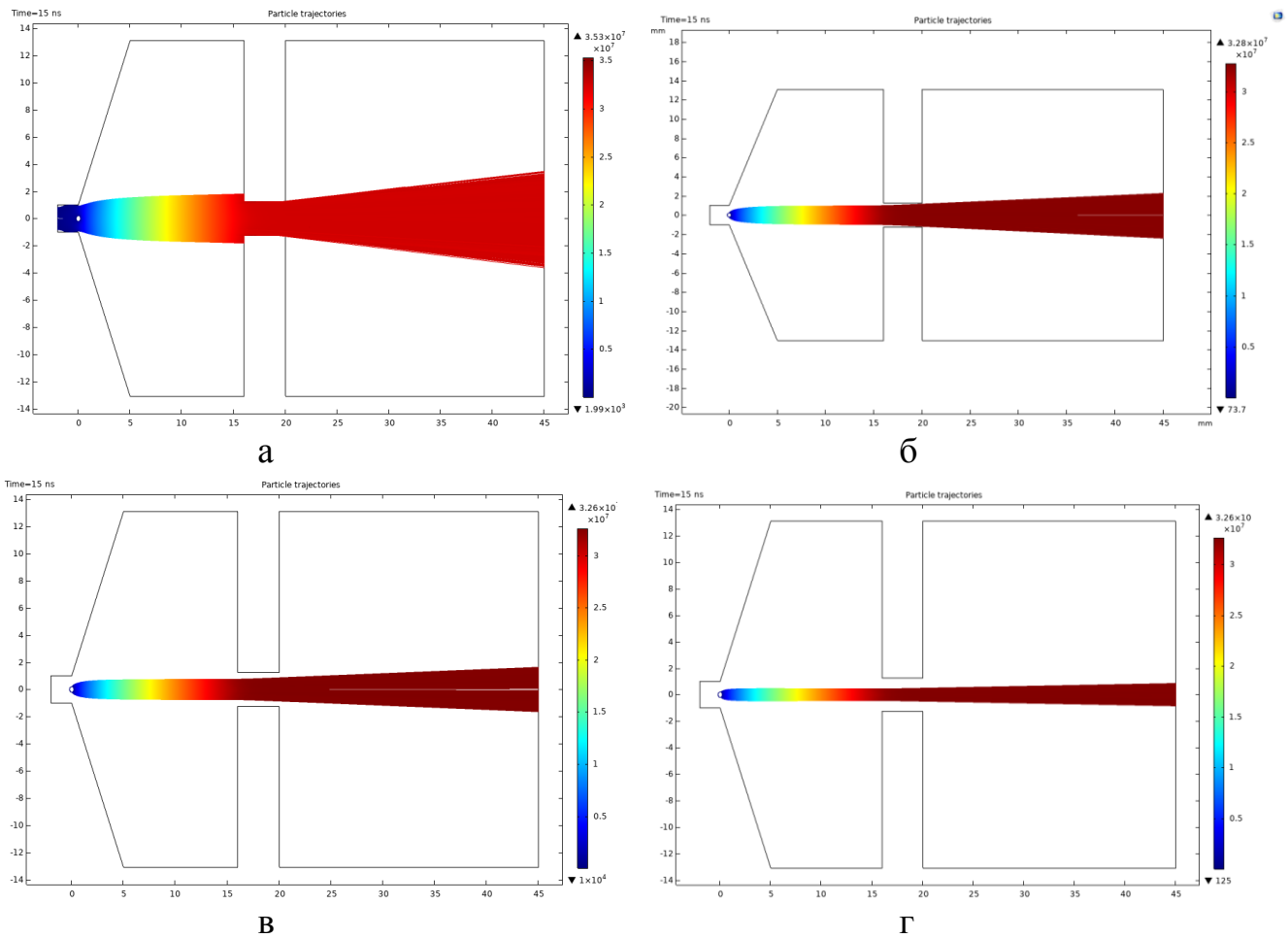


Рис. 4. Результати моделювання з визначення форми траєкторій електронів в гарматі Пірса при $I_{роз.}=12,5$ А, $U_{пр}=3$ кВ, $I_{пот}=210$ мА: а – $U_{мод}=0$ В; б – $U_{мод}=25$ В; в – $U_{мод}=35$ В; г – $U_{пр}=45$ В

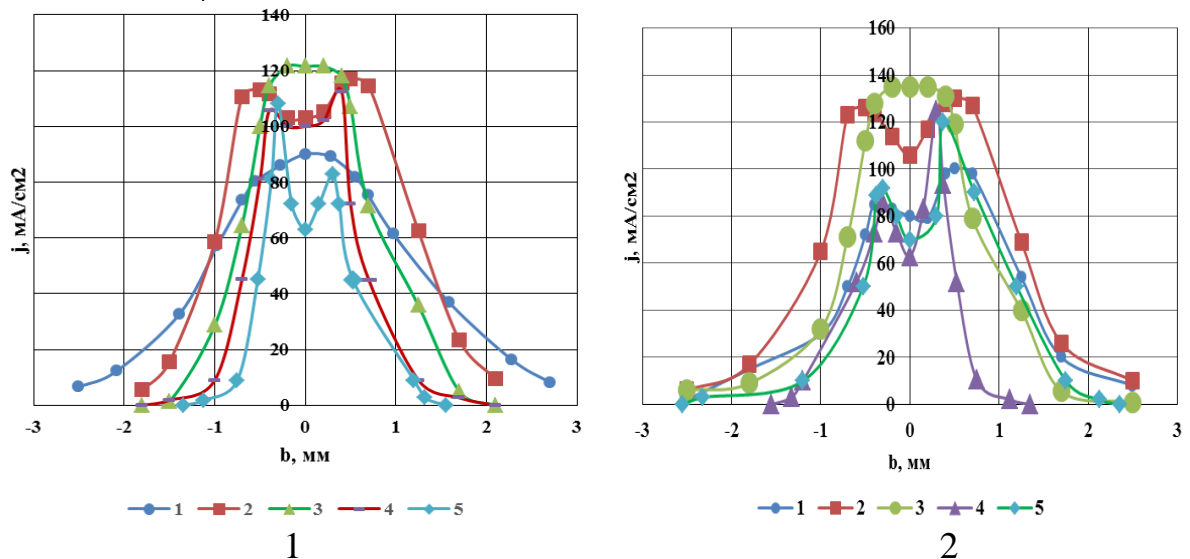


Рис. 5. Зондові характеристики електронного потоку: розподіл густини струму розрахований на основі зондового струму в електронному потоці ($U_{пр}=2,5$ кВ(1), $U_{пр}=3,0$ кВ(2) 1 – $U_{мод}=0$ В; 2 – $U_{мод}=25$ В; 3 – $U_{мод}=35$ В; 4 – $U_{мод}=45$ В 5 – $U_{мод}=55$ В)

Для розрахунку розповсюдження температури у оптичному елементі під час дії низькоенергетичного електронного потоку стрічкової форми була запропонована тривимірна модель.

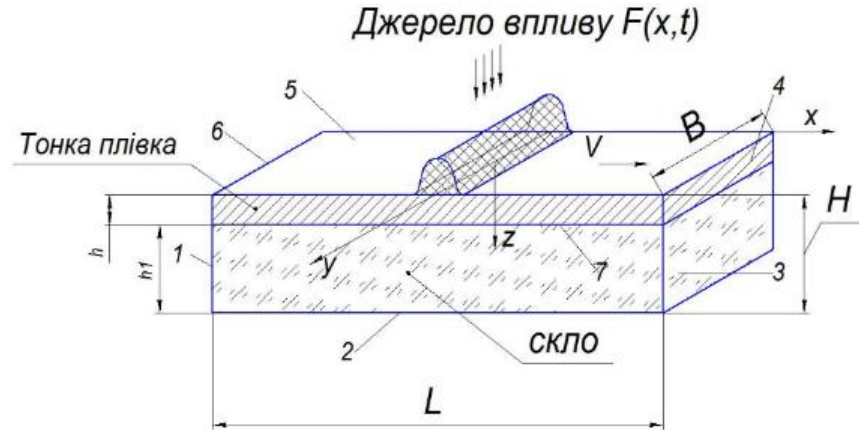


Рис. 6. Схема дії рухомого низькоенергетичного електронного потоку на поверхню оптичного елемента прямокутної форми: $F(x,t)$ – розподіл потужності джерела (розподіл Гауса), H , L , B – відповідно, товщина, довжина і ширина виробу; h – товщина тонкої плівки; h_1 – товщина підкладки; H – товщина системи в цілому $H = h + h_1$; V – швидкість переміщення оптичного виробу в зоні дії електронного потоку.

Розподіл потужності при електронно-променевому обробленні описується згідно закону $F(x,t)$. Для опису розподілу температури всередині деталі, використовуються диференціальні рівняння:

$$C_v(T) \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (9)$$

$\lambda(T)$ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); $C_v(T)$ – об'ємна теплоємність, Дж/(кг·К)

Початкові та граничні умови

Початкові умови: $T(x, z)|_{t=0} = T_0$

Границя 5 (рис. 6.): тепловий потік через поверхню (нелінійні крайові умови)

$$-n \left(-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = F(x, t) + \varepsilon \sigma (T_c^4 - T^4) \quad (10)$$

Границі 4: тепловий потік через поверхню (нелінійні крайові умови)

$$-n \left(-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \varepsilon \sigma (T_c^4 - T^4) \quad (11)$$

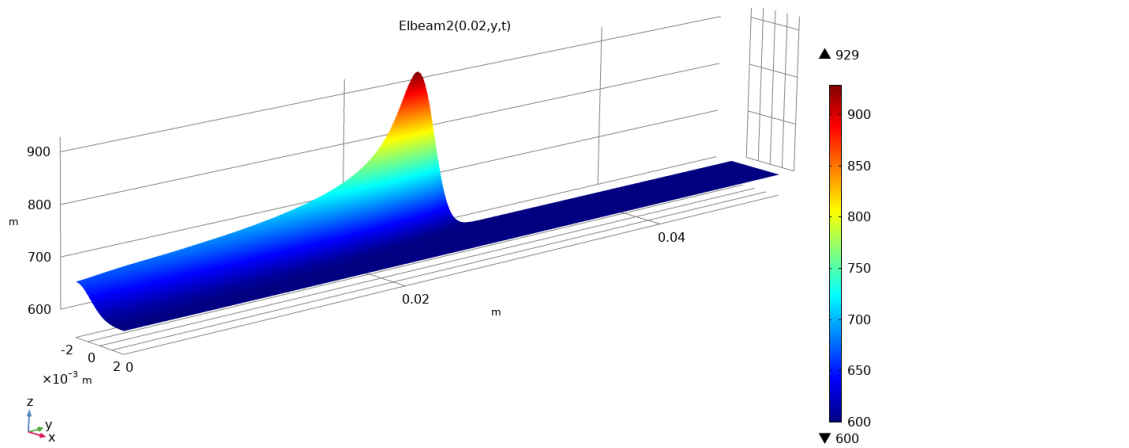
Границі 1, 2, 3: температура на поверхні (крайові умови I-го роду)

$$T(x, y) = T_0, \quad T(x, y) \in S_{1,2,3} \quad (12)$$

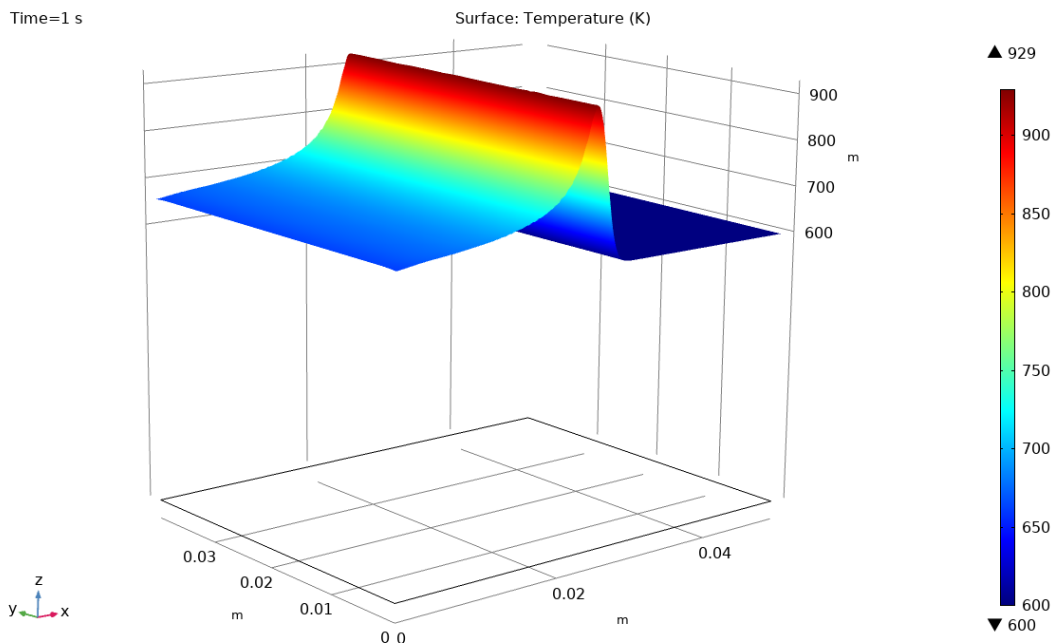
Границя 7: тепловий потік через поверхню з тонкою плівкою

$$-q_d = -\frac{1}{2} d_s \rho C_p \frac{\partial T_d}{\partial t} - \frac{(T_u - T_d)}{R_s} \quad -q_u = -\frac{1}{2} d_s \rho C_p \frac{\partial T_u}{\partial t} - \frac{(T_d - T_u)}{R_s} \quad (13) \quad (14)$$

де R_s – термічний опір плівки, q_s – густина теплового потоку між поверхнею та тонкою плівкою, q_u – густина теплового потоку між поверхнею та навколишнім середовищем.



а – розподіл температури по глибині зразка



б – розподіл температури на поверхні зразка

Рис. 7. Результати розрахунку розподілу температури в різних площинах оптичного елемента, який складається з оптичного скла К8 та тонкої алюмінієвої плівки, технологічні параметри ЕПО: $I_k = 12,5$ А, $U_{пр} = 3$ кВ $U_{мод} = 35$ В, $I_{пот} = 210$ мА, $V = 1,35$ см/с

Дана модель дозволяє розраховувати розподіл температури в оптичному елементі під час КЕПО.

В четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень оптичних елементів отриманих з використанням КЕПО.

На основі проведених досліджень по визначенню мікрорельєфу поверхні оптичного скла марки К8 та ТК14 були встановлені залежності, які дали змогу визначити вплив основних технологічних параметрів (питомої потужності та швидкості обробки) ЕПО на середньоарифметичні мікронерівності R_a поверхні, рис. 8.

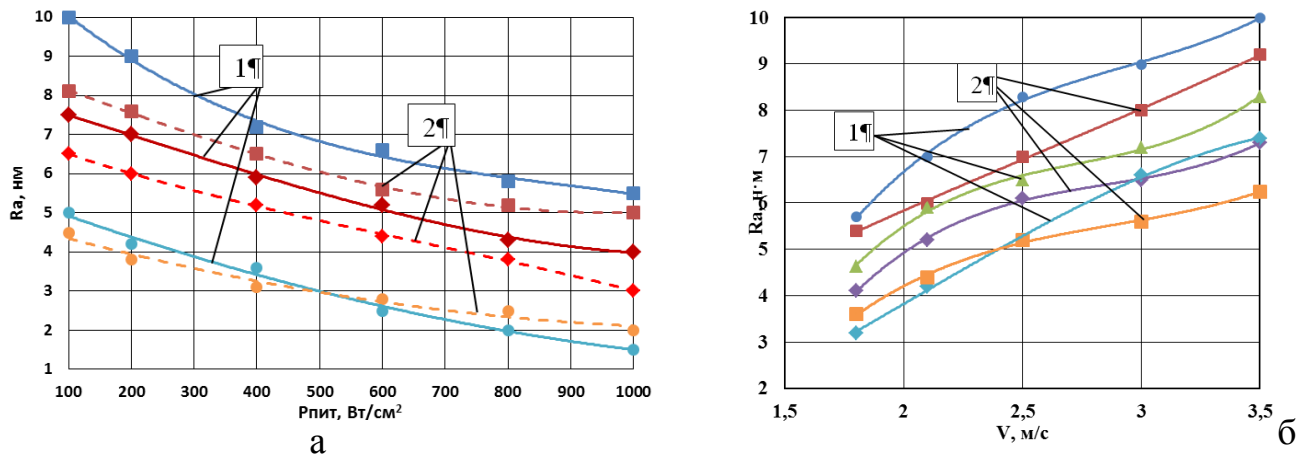


Рис. 8. Залежність середньоарифметичної шорсткості поверхні Ra оптичного скла марки К8(1) та ТК14 (2) – (а) - від питомої потужності потоку $P_{\text{пит}}$ при різних швидкостях ЕПО (А - $V = 1,2$ см/с; Б - 2,5, С - 3 см/с); (б) – від швидкості ЕПО при різних значеннях питомої потужності потоку ($P_{\text{пит}} = 200$ Вт/см²(А); 400 Вт/см²(Б), 600 Вт/см²(С))

Відомо, що середньоквадратичне відхилення поверхні оптичного скла до та після ЕПО є найбільш інформативною величиною, яка дає можливість охопити всі типи поверхонь. В результаті проведених досліджень було встановлено, що після низькоенергетичної ЕПО поверхні оптичного скла відбувається зменшення відхилення поверхні з $RMS = -0,06 \dots 0,06$ до $RMS = -0,038 \dots 0,04$, рис.9.

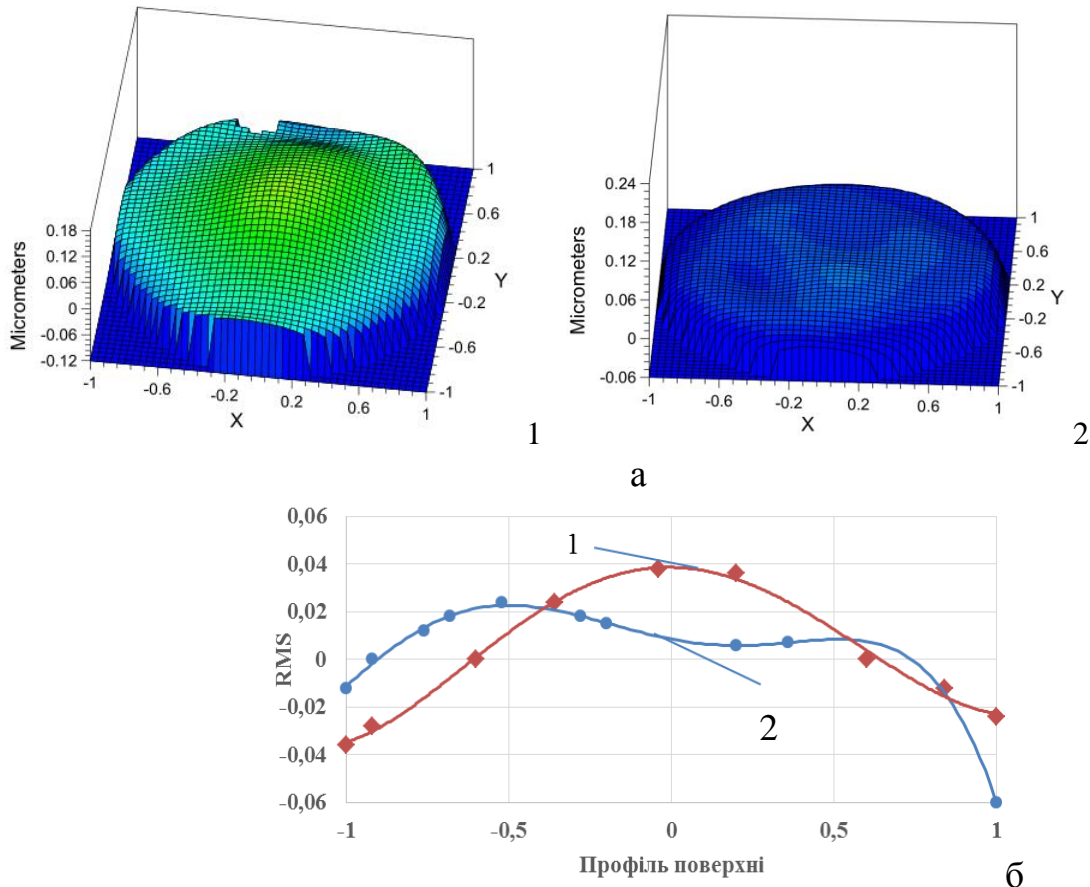


Рис.9. Інтерферограма поверхні оптичних виробів (оптичне скло К8) (а) та середньоквадратичне відхилення поверхні при різних режимах обробки (б) (1- $P_{\text{пит}} = 600$ Вт/см², 2 - $P_{\text{пит}} = 400$ Вт/см²) після ЕПО

В результаті проведених досліджень було встановлено, що тонкі плівки алюмінію отриманні за базовою та комбінованою технологіями з подальшою витримкою в морській воді протягом 1 хв; 15 хв та 60 хв, 900 хв. мають відповідно наступні залишкові мікрошорсткості: 16,8 нм; 17,3 нм; 17,8 нм, 27,9 нм – для зразків отриманих за базовою технологією та 15,3 нм; 17,1 нм; 18,0 нм, 22,3 нм – для модифікованих зразків. При впливі УЗ-коливань було встановлено, що залишкові мікрошорсткості поверхні тонкої плівки алюмінію, яка виготовлена за базовою технологією збільшуються з 15...17 нм до 110...125 нм, а сама поверхня стає неоднорідною та містить значну кількість нанодфектів. В той же час залишкові мікрошорсткості поверхні тонкої алюмінієвої плівки, яка виготовлена з використанням КЕПО залишаються на рівні 15...18 нм

Встановлено, що тонкі плівки, які отриманні за базовою технологією мають більшу кількість зон з підвищеними механічними напруженнями, в порівнянні з тонкими плівками одержаними комбінованою технологією, що може бути пов'язане з релаксаційними процесами, які відбуваються в покриттях при дії на них електронного потоку.

Дослідження мікрошорсткості поверхні тонких плівок срібла методом АСМ, показують, що використання КЕПО, дає змогу отримувати плівки з більш однорідною структурою, з меншою кількістю мікродфектів, які притаманні тонким плівкам отриманими за базовою технологією. Середньостатистична шорсткість поверхні таких плівок складає 35-50 нм (за базовою технологією становить 50-75 нм).

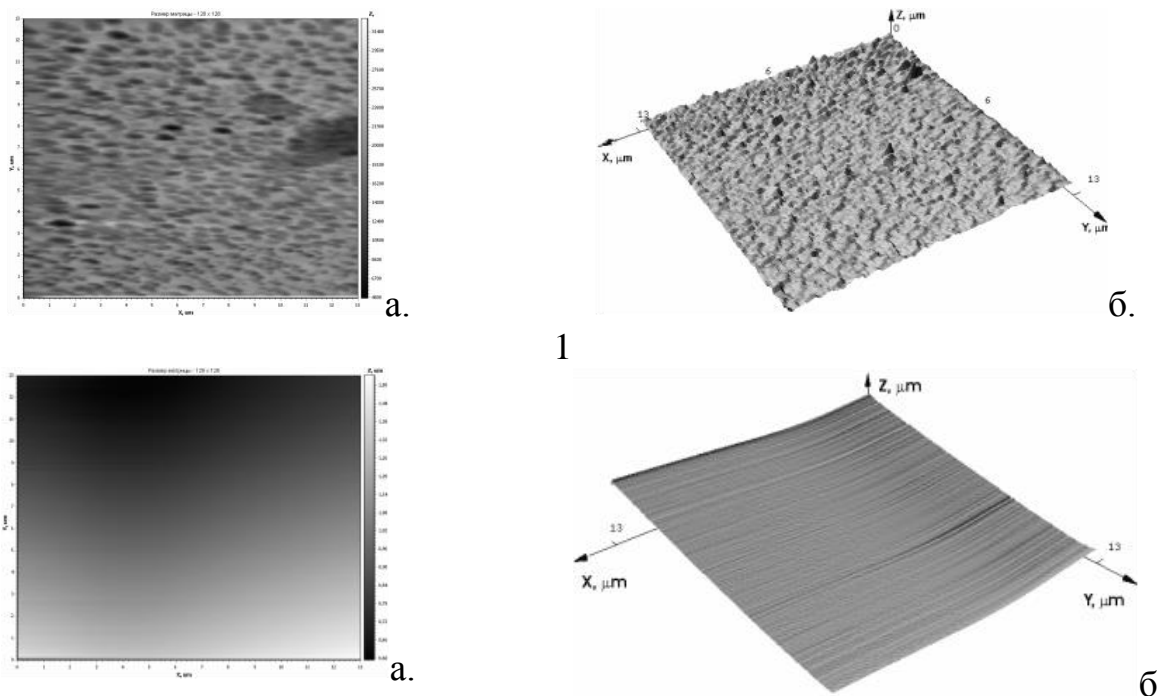


Рис.10. Топограма (а), мікрорельєф (б) площадки поверхні тонкої плівки (Ag) на ділянці 13х13 мкм на оптичному склі марки К8 1 – отримана за базовою технологією 2 - отримана з використанням КЕПО

Встановлено, що після ЕПО поверхні скляної підкладки відбувається зменшення мікрошорсткості поверхні осадженої на неї тонкої плівки золота (Rms зменшилась у 2 рази з 4,67 нм до 2,32 нм при питомій потужності 27,84 Вт/мм² та у

3 рази з 4,67 нм до 1,64 нм при питомій потужності 36,62 Вт/мм²). Електронно-променева обробка поверхні підкладинок чутливих елементів ППР-приладів призвела до звуження їх рефрактометричних характеристик майже в 2 рази (з 0,453 град. до 0,867) та підвищилась чутливість приладу в 1,7 рази (з 1,425 град⁻¹ до 2,396 град⁻¹) внаслідок зменшення втрат при розповсюдженні поверхневих плазмонів вздовж границі метал-повітря.

Встановлено, що модифікування кремнієвих зондів скануючої зондової мікроскопії тонким вуглецевим покриттям за розробленою технологією КЕПО дозволило зменшити субшорсткість поверхні наноінструментарію, підвищити на 10–15% їх мікротвердість та зносостійкість, що збільшує термін їхньої експлуатації на 45–55%.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення і нове розв'язання наукового завдання з вдосконалення технології та обладнання для комбінованого електронно-променевого оброблення оптичних елементів, що відповідає меті та задачам дослідження і відображено в таких результатах:

1. Модернізоване технологічне обладнання для комбінованого електронно-променевого оброблення оптичних елементів шляхом удосконалення вузлів та блоків з резистивного нанесення покриття, електронно-променевого оброблення та контролю параметрів оброблення, що дозволило реалізувати в одному технологічному циклі осадження тонких плівок та їх подальше модифікування стрічковим електронним променем, що забезпечить отримання високих якісних характеристик оптичних елементів.

2. Розроблена автоматизована система гнучкого керування режимами електронно-променевого оброблення дозволяє безпосередньо в процесі робочого циклу керувати питомою потужністю ($P_{\text{ном}} = (0 \dots 1000) \pm 0,02$ Вт/см²) та змінювати її розподіл за рахунок зміни напруги на модуляторі, що призводить до підвищення точності (на 5...8%) та повторюваності (у 2,2...2,5 рази) результатів оброблення.

3. Удосконалена математична модель енергетичної взаємодії стрічкового електронного потоку з поверхнею оптичного матеріалу з покриттям, яка дозволяє врахувати ефект тонкої плівки з більшою теплопровідністю ніж у основного матеріалу та розрахувати розподіл теплових полів в оптичному елементі, що забезпечує швидке та високоточне (відносна похибка не перевищує 10-15%) визначення робочих параметрів режимів якісного комбінованого електронно-променевого оброблення.

4. Розроблена та впроваджена системи зондування низькоенергетичного електронного потоку стрічкової форми дозволяє у режимі реального часу визначити та корегувати енергетичні параметри електронного потоку (коефіцієнт ефективності, розподіл щільності електронного потоку) шляхом зміни робочих параметрів електронно-променевої гармати Пірса (напруга на модуляторі, прискорююча напруга, струм розжарення), що гарантовано підвищує стабільність електронного потоку і, як наслідок, якісні характеристики оптичних елементів.

5. Дослідження оптичних елементів після комбінованого електронно-променевого оброблення показали:

- зменшення мікрошорсткості поверхні до $R_a = 1,5...10,0$ нм (скло К8) та, відповідно, $R_a = 2,0...8,1$ нм (скло ТК14);
- збільшення коефіцієнта пропускання оптичного скла К8 на 1-2,5% ($\lambda=400-1000$ нм), для скла ТК14 з 57 до 62,2% ($\lambda=330$ нм);
- зменшення відхилення поверхні з $RMS = -0,06...0,06$ до $RMS = -0,038...0,04$;
- покращення поверхні тонких плівок (збільшення однорідності структури та позбавлена мікроефектів, зменшення середньостатистичної шорсткості поверхні до 35–50 нм).

6. Основні результати дисертаційної роботи знайшли практичне застосування на вітчизняних (ПМПП «Фотоніка Плюс», ПрАТ «Укрп'єзо», ТОВ НВФ "ОНТФ", (м. Черкаси), а оптичні елементи отримані з використанням даної технології, що використовуються на ТДВ «Микротестмашины» (м. Гомель, Білорусь) в якості дзеркал системи фотодетектування атомно-силового мікроскопу дозволяють в 1,5-2 рази підвищити точність і відтворюваність позиціонування лазерного випромінювання.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. Покриття у приладобудуванні [Текст]: монографія / В.С. Антонюк, Г.С. Тимчик, Ю.Ю. Бондаренко, Ю.І. Коваленко [та ін.] // К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 360 с. URL: <http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/36387/1/Pokryttya-u-pryladobud.pdf> (Автором проведено аналіз сучасних фізичних методів та засобів отримання покриттів, описано принципи отримання тонких покриттів, розглянуто основне технологічне обладнання для отримання покриттів).

Статті у фахових виданнях:

2. Vashchenko V.A. Effect of electron-beam treatment of sensor glass substrates for SPR devices on their metrological characteristics / V.A. Vashchenko, I.V. Yazenko, Yu.I. Kovalenko, V.P. Kladko, O.Yo.Gudenko, P.M. Lytvyn, A.A. Korchovy, S.V. Mamykin, O.S. Kondratenko, V.P. Maslov, H.V. Dorozinska, G.V. Dorozinsky. / International scientific journal Semiconductor physics quantum electronics & Optoelectronics – Volume 22, № 4. 2019. – P.444-451. URL: <https://doi.org/10.15407/spqeo22.04.44> (Здобувач виконав експериментальну роботу та аналіз впливу параметрів електронно-променевого оброблення на якісні характеристики покриттів на оптичному склі) (Іноземне видання. Видання включене до міжнародної науково-метричної бази SCOPUS та індексується директором відкритого доступу (DOAJ)).

3. Antonyuk V.S. Formation of Wear-Resistant Coatings on Silicon Probes for Atomic Force Microscopy by Thermal Vacuum Evaporation / Antonyuk V.S., Bilokin S.O. Bondarenko M.M., Bondarenko Yu.Yu., Kovalenko Yu.I. // Journal of superhard materials. – 2015. – Vol.37. – No. 2. – pp.112-119. URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1063457615020057> Автором запропоновано режими і здійснено осадження тонких плівок у вакуумі резистивним методом

(Іноземне видання. Видання включене до міжнародної науково-метричної бази SCOPUS та індексується директорією відкритого доступу (DOAJ)).

4. Rud M.P., Boyko V.P., Kovalenko Yu.I., Bondarenko M.A., Kanashevich G.V., Vaschenko V.A. The express-diagnostics of band electronic stream / Вісник Черкаського державного технологічного університету, №3, 2005. – С.49-51. *(Автором проведено технологічний експеримент з зондування електронного потоку стрічкової форми).*

5. Коваленко Ю.І. Дослідження впливу морської води на мікрогеометрію поверхні металевих покриттів на оптичному склі K8 / Ю.І. Коваленко, М.О. Бондаренко, І.А. Рева, В.А. Ващенко [та ін.] / Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. – Маріуполь: ПДТУ, 2010. – Вип. 20. – С. 222-225. URL: <http://eir.pstu.edu/handle/123456789/179> *(Автором проведено обробку результатів дослідження впливу морської води на поверхню металевих покриттів на оптичному склі)* (Видання включене до міжнародних науково-метричних баз даних Google Scholar, Russian Science Citation Index, Ukrainian abstract journal “Dzherelo”, Referativnyi Zhurnal (VINITI)).

6. Коваленко Ю.І. Модифікація нанорельєфу на оптичному склі електронно-променевою мікрообробкою / Ю.І. Коваленко, М.О. Бондаренко, І.В. Яценко, М.П. Рудь [та ін.] / Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Черкаси: ЧДТУ, 2012. – №1 – С. 104-107. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/162871263.pdf> *(Автором проведено електронно-променеву мікрообробку поверхні оптичного скла).*

7. Рудь М.П., Дослідження та формування стрічкового електронного потоку для мікрообробки поверхонь матеріалів / М.П. Рудь, М.О. Бондаренко, Ю.І. Коваленко, І.В. Яценко [та ін.] / Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. – №2 – С. 58-63. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/doslidzhennya-ta-formuvannya-strichkovogo-elektronnogo-potoku-dlya-mikroobrobki-poverhon-materialiv/viewer> *(Автором проведено технологічний експеримент з дослідження стабільності стрічкового електронного потоку при мікрообробленні оптичних матеріалів).* (Видання включене у довідник періодичних видань бази даних Ulrich’s Periodicals Directory (New Jersey, USA)), Ukrainian abstract journal “Dzherelo”, Referativnyi Zhurnal (VINITI)).

8. Коваленко Ю.І. Вплив режимів ультразвукового очищення п'єзоелектричних елементів на якість сформованих на їхніх поверхнях срібних електродів / Ю.І. Коваленко, М.О. Бондаренко, Ю.Ю. Бондаренко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: машинобудування: зб. наук. праць. – Київ: НТУУ «КПІ», 2012. – №64. – С. 87-90. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/3035/1/87-64.pdf> *(Автором проведено обробку результатів дослідження впливу ультразвукового очищення на поверхню срібного покриття на діелектрику).* (Видання включене до міжнародних науково-метричних баз даних Google Scholar, Russian Science Citation Index, Ukrainian abstract journal “Dzherelo”, Referativnyi Zhurnal (VINITI)).

9. Антонюк В.С. Підвищення мікротвердості та зносостійкості поверхонь елементів виробів з оптичного скла мікрообробкою електронним потоком у вакуумі

/ В.С. Антонюк, Ю.І. Коваленко, Ю.Ю. Бондаренко, М.О. Бондаренко / Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія Технічні науки. Вип. 31 (72) – 2015. – С. 3-9. (*Автором проведено електронно-променеву мікрообробку поверхні оптичного скла*) (Видання включене до міжнародної науково-метричної бази даних Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar).

10. Bondarenko M. Research of volt-ampere characteristics of the wire pierce electron gun at electron-beam microprocessing of dielectrics / Bondarenko M., Antonyuk V., Kovalenko Yu., Rud M., Haidash R // Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science. – 2018. – Vol.4. – No. 1. – pp.58-64. URL: http://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2018/jul/13701/maksym_bondarenko.pdf (*Автором експериментально отримані дані для побудови вольт-амперних характеристик*) (Видання включене до міжнародних науково-метричних баз даних Google Scholar, Index Copernicus, Open Academic Journals Index (CGIJ), Research Bib (Academic Resource Index)).

11. Коваленко Ю.І. Дослідження вольт-амперних характеристик дрітної електронної гармати Пірса для електронно-променевої мікрообробки діелектриків / Ю.І. Коваленко, М.О. Бондаренко, В.С. Антонюк/ Технічна інженерія, наукове видання Державного університету "Житомирська політехніка". № 1 (85), 2020. – С. 53-59. URL: [https://doi.org/10.26642/ten-2020-1\(85\)-53-59](https://doi.org/10.26642/ten-2020-1(85)-53-59) (*Автором проведено технологічний експеримент з визначення вольт-амперних характеристик електронної гармати Пірса*). (Видання включене до міжнародної науково-метричної бази даних Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar).

Статті у інших виданнях:

12. Рудь М.П. Моделювання низькоенергетичної стрічкової електронної гармати Пірса методом кінцевих елементів / М.П. Рудь, Г.В. Канашевич, М.О. Бондаренко, Ю.І. Коваленко / Наукові праці: науково-методичний журнал. – Вип.179. Т.191. Комп'ютерні технології. – Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2012 – С. 28 – 31. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npchduct_2012_191_179 (*Автором проведено обробку результатів моделювання електронної гармати Пірса*). (Видання включене до міжнародних науково-метричних баз даних Google Scholar, Russian Science Citation Index, Ukrainian abstract journal "Dzherelo", Referativnyi Zhurnal (VINITI)).

13. Коваленко Ю.І. Тест на змочування поверхні скла після електронно-променевої мікрообробки / Ю.І. Коваленко, П.В. Петльований, М.П. Рудь, Г.В. Канашевич // Вісник українського матеріалознавчого товариства - Київ, 2012. - № 5. - С. 57-62. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/125373> (*Автором проведено постановку та проведення експерименту з визначення коефіцієнту змочування поверхні скла після електронно-променевого мікрооброблення*). (Видання включене до міжнародної науково-метричної бази даних Google Scholar).

14. Гайдаш Р.П. Формування та керування стрічковим електронним потоком при мікрообробленні елементів пристроїв для адитивного виробництва / Р.П.Гайдаш, Ю.І.Коваленко, М.П.Рудь, М.О.Бондаренко, В.С.Антонюк // Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – Вип. 13. – С. 69-78. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Stvm_2018_13_10 (*Автором проведені теоретичні та експериментальні дослідження керованості стрічкового електронного потоку при*

мікрообробленні діелектричних матеріалів). (Видання включене у довідник періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)).

15. Barabash V. Investigation of the influence of basic technical parameters of ribbon electron flow on the microrelief of the optical glass surface /V. Barabash , I. Zhaivoronok, Y. Kovalenko, V. Antonyuk/ International scientific journal "Machines. Technologies. Materials" Issue 3/2020 , с.106-109. *(Автором проведено технологічний експеримент з зондування електронного потоку стрічкової форми та електронно-променевого оброблення оптичного скла).*(Іноземне видання)

Патенти на корисну модель:

16. Патент №2004021257 Україна, МПК⁶ C03B29/00; H01J37/305. Пристрій для електронно-променевого полірування виробів / Г.В.Канашевич, Ю.І.Коваленко, М.О.Бондаренко, В.А.Ващенко, В.П.Бойко, М.П.Рудь, І.В.Яценко. Заявл. 20.02.2004; опублік. 17.01.2005; Бюл. №1. – 3 с. *(Участь у створенні винаходу всіх співавторів однакова).*

17. Патент № u201507234 Україна, МПК⁶ C03B 29/00 C03B 33/00. Спосіб обробки скла / Канашевич Г.В. Голуб М.В., Коваленко Ю.І. Заявл. 20.07.2015; опублік. 11.04.2016; Бюл.№7. – 4 с. *(Участь у створенні винаходу всіх співавторів однакова).*

Тези доповідей у збірках матеріалів конференцій:

18. Бондаренко М.А. Исследование микрогеометрии поверхности оптических стекол после электронной и после лазерной обработки методом атомно-силовой микроскопии / М.А.Бондаренко, Ю.Б.Шевченко, В.П.Бойко, Ю.И.Коваленко [и др.] // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: VII Междунар. сем., 1–3 ноября 2006 г: тезисы докл. – Минск, 2006. – С. 139-142. *(Автором проведено порівняльний аналіз електронного та лазерного методів оброблення поверхонь елементів з оптичного скла).*

19. Рудь М.П. Впровадження комп'ютеризованої системи керування в процес електронної обробки оптичних матеріалів / М.П.Рудь, Г.В.Канашевич, В.П.Бойко, Ю.І.Коваленко [и др.] // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: VII ежегод. междунар. пром. конф., 12-16 лютого 2007 р.: тезисы доп. – сел.Славське-м.Київ, 2007. – С. 460. *(Автором сконструйовано автоматизовану систему керування).*

20. Рудь М.П. Дослідження просторово-енергетичних характеристик електронного потоку стрічкової форми / М.П. Рудь, В.А. Ващенко, Ю.І. Коваленко, В.П. Бойко, І.В. Яценко // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: X междунар. Пром. конф., 18-22 лютого 2010 р: тезисы доп. – сел. Славське-м. Київ, 2010. – С. 162-164. *(Автором експериментально отримані просторово-енергетичні характеристики електронного потоку стрічкової форми).*

21. Рудь М.П. Применение метода атомно-силовой микроскопии, как составляющей комплексной методики измерения параметров качества оптических изделий, обработанных низкоэнергетическим электронным потоком / М.П. Рудь, В.П. Бойко, Г.В. Канашевич, Ю.И. Коваленко, И.А. Рева, В.А. Ващенко //

Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: IX Междунар. конф., 12-15 октября 2010 г: тезисы докл. – Минск, 2010. – С. 220-223. *(Автором систематизовані показники якості виробів після електронного оброблення).*

22. Коваленко Ю.И. Изучение упорядоченных структур, сформированных на металлизированных поверхностях диэлектриков комбинированной электронной технологией / Ю.И. Коваленко, М.П. Рудь, I.B. Яценко, А.В. Котляр, В.П. Бойко // Электронная микроскопия РКЭМ-2012: XXIV Рос. конф., 29 мая-1 июня 2012: тезисы докл. – г.Черноголовка, 2012. – С. 97. *(Автором проведено комплексне дослідження впорядкованих структур на діелектриках).*

23. Бондаренко М.О. Оцінка адгезійної міцності на стирання оксидних покриттів на оптичному склі методом атомно-силової мікроскопії / М.О.Бондаренко, Ю.І.Коваленко, I.A.Рева, I.B. Яценко [та ін.] // Приладобудування: стан і перспективи: XII міжнар. наук.-техн. конф., 23-24 квітня 2013 р: тези доп. – м. Київ, 2013. – С. 207. *(Автором підготовлено методичні рекомендації для оцінки адгезійної міцності оксидних покриттів на оптичному склі).*

24. Kovalenko Y.I. Study of ordered oxide patterns got on the dielectric surfaces with the combined electronic technology / Y.I.Kovalenko, M.A.Bondarenko, E.V.Vertsanova, I.V.Iatsenko [etc.] // Physics and technology of thin films and nanosystems: XIV Intern. conf.: thesis, May, 20-25, 2013. - Ivano-Frankivsk, 2013. – pp. 92. *(Автором запропоновано режими і здійснено комбіноване електронно-променево оброблення оксидних покриттів осаджених на діелектричних поверхнях).*

25. Антонюк В.С. Модифицирование металлизированных поверхностей ленточным электронным потоком / В.С. Антонюк, Ю.И. Коваленко, М.А. Бондаренко, И.В. Яценко // Инженерия поверхности и реновация изделий: XIII Междунар. науч.-техн. конф., 3-7 июня 2013 г: тезисы докл. – г.Ялта-г.Киев, 2013. – С. 15-19. *(Автором проведено експериментальне модифікування металізованих поверхонь стрічковим електронним потоком).*

26. Бондаренко М.А. Изучение механизма формирования ультратонких функциональных покрытий на оптическом стекле при комбинированной электронно-лучевой микрообработке / М.А. Бондаренко, Ю.И. Коваленко, Ю.Ю. Бондаренко, С.А. Билоконь [и др.] // Современные проблемы физики конденсированного состояния, нанотехнологий и наноматериалов: III междунар. науч. конф., 15-16 мая 2014: матер.докл.– Алматы: Казах университети, 2014. – С. 64-65. *(Автором експериментально підтверджено механізм формування ультратонких функціональних покриттів на оптичному склі електронним потоком).*

27. Антонюк В.С., Повышение износостойкости деталей оптического приборостроения / В.С. Антонюк, Ю.И. Коваленко, М.О Бондаренко //”Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте”: Материалы 14-го Международного научно-технического семинара, 24 - 28 февраля 2014 г. Свалява – Киев: АТМ Украины.- 2014. – С. 13 – 17. *(Автором проведено експериментальне одержання зразків для дослідження).*

28. Гайдаш Р.П. Математичне моделювання в задачах оптимального керування процесом електронно-променевої мікрообробки діелектричних матеріалів / Р.П. Гайдаш, Ю.І. Коваленко, Ю.Ю. Бондаренко // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: Материалы международной научно-

технической конференции, 26-29 сентября 2018 г., г. Одесса. – Одесса: ОНПУ, 2018. – С. 27. *(Автором проведено постановку та розв'язок математичної моделі оптимального керування електронно-променевим мікрообробленням діелектриків).*

29. Коваленко Ю.И. Исследование распределения энергии в зоне действия ленточного электронного потока / Ю.И. Коваленко, В.С. Антонюк, Л.Г. Полонский // 36. тез доповідей І–ї Міжнародної науково-технічної конференції “Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019”; 13–15 травня 2019 р., – Вінниця : ПП «ТД «Едельвейс і К», 2019. С. 295- 296. *(Автором проведене експериментальне отримання зон термічного впливу на термочутливому матеріалі)*

30. Коваленко Ю.І. Експериментальне дослідження адгезійної міцності зносостійких покриттів на оптичних виробах після їх електронно-променевого модифікування / Коваленко Ю.І., Антонюк В.С./ 36 праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент», 06–09 листопада 2019 р., м. Житомир, Державний університет «Житомирська політехніка» 2019 – С. 123-125. *(Автором проведене експериментальне модифікування поверхні тонкої плівки стрічковим електронним потоком).*

АНОТАЦІЯ

Коваленко Ю. І. Підвищення якісних характеристик оптичних елементів комбінованою електронно-променевою обробкою. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.07 – процеси фізико-технічної обробки. – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” МОН України, м. Київ, 2021.

Дисертація присвячена теоретичному узагальненню і новому розв'язанню наукової задачі з вдосконалення технології та обладнання для комбінованого електронно-променевого оброблення (поєднання резистивного методу осадження тонких покриттів і електронно-променевого оброблення в одному технологічному циклі) оптичних елементів шляхом застосування автоматизованої системи гнучкого керування режимами оброблення, удосконалення математичних моделей, існуючого та розроблення нового методичного, програмно-апаратного, технічного забезпечення, що дозволяє зменшити мікрошорсткості поверхні осадженої на неї металевої плівки, підвищити їх механічну міцність, а також визначити діапазон робочих параметрів комбінованої електронно-променевої обробки, що забезпечують її високу якість та ефективність.

Ключові слова: тонкі плівки, якісні характеристики оптичних елементів, комбінована електронно-променева технологія, електронно-променева гармата.

АННОТАЦИЯ

Коваленко Ю. И. Повышение качественных характеристик оптических элементов комбинированной электронно-лучевой обработкой. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.07 - процессы физико-технической обработки. - Национальный

технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" МОН Украины, г. Киев, 2021.

Диссертация посвящена теоретическому обобщению и новому решению научной задачи совершенствования технологии и электронно-лучевого оборудования комбинированной электронно-лучевой обработки (сочетание резистивного метода осаждения тонких покрытий и электронно-лучевой обработки в одном технологическом цикле) оптических элементов путем применения автоматизированной системы гибкого управления режимами обработки, совершенствование математических моделей, существующего и разработки нового методического, программно-аппаратного, технического обеспечения, что позволяет уменьшить микрошероховатости поверхности осажденной на нее металлической пленки, повысить их механическую прочность, а также определить диапазон рабочих параметров комбинированной электронно-лучевой обработки, обеспечивающих ее высокое качество и эффективность.

Ключевые слова: тонкие пленки, качественные характеристики оптических элементов, комбинированная электронно-лучевая технология, электронно-лучевая пушка.

SUMMARY

Kovalenko Y.I. Quality characteristics ty improvement of optical elements by combined electron-beam processing. – On the right of manuscript.

The thesis for obtaining a candidate of technical sciences degree, specialty – 05.03.07 – Processes in physical and technical processing. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ministry of Education and Science of Ukraine. – Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the theoretical synthesis and new solution of the scientific problem of technology and equipment improvement of the combined electron-beam processing of optical elements.

To implement the combined electron beam processing (combination of resistive method of deposition of thin coatings and electron beam processing in one technological cycle) the modernization of technological vacuum equipment and technological equipment (Pierce electronic gun, forming a tape-shaped electronic stream, resistive evaporator, electronic evaporator, mechanism for moving optical plates, quartz heaters for preheating and final cooling, high-voltage power supply, electronic flow control system and electronic control system -radiation processing).

A number of methods have been developed, namely: the method of modifying the surfaces of combined electron beam processing optical materials (determines the technological sequence of operations in combined electron beam processing optical elements to obtain high quality surfaces), the method of assessing the surface quality of optical elements by atomic force microscopy (determines the surface quality of optical elements). technological modes that provide minimal roughness of the treated surface). A method for diagnosing and controlling the current density distribution of a low-energy electronic stream of tape shape is proposed, which allows to automatically determine the spatial and energy characteristics of the parameters of the tape electronic stream directly in the process of electron beam processing. The use of an automated system of flexible

control of electron-beam processing modes allows to control the specific power directly during the operating cycle and change its distribution by changing the voltage on the modulator, which leads to increased accuracy (5... 8%) and repeatability (2.2... 2.5 times) the results of processing.

To understand the processes that occur as a result of the interaction of the electron flow with thin films on optical glass, a mathematical model for determining the spatial temperature distribution in such a system is built.

This model which takes into account the geometric and energy parameters of the electron flow obtained in real time and by means of which the distribution of thermal fields in an optical element is operatively determined.

A computer model of the Pierce electronic gun of a given design is constructed, and the calculations of the electrostatic field and the trajectory of the electrons are performed, taking into account the influence of the bulk charge and the initial velocity. To increase the efficiency (the ratio of the current of the electronic flow, which falls to the total current of the electronic flow), the voltage is controlled on the modulator, which will increase the efficiency of the electronic flow and change its shape.

As a result of probing the electron flow of the tape shape, it was found that at different parameters of the Pierce gun in practice there are different laws of current density distribution, which are different from the Gaussian distribution. This is due to the differences in the design of the electron beam gun from the ideal optics of Pierce. Probing the electron flow in the process of combined electron beam processing will allow you to control and manage the parameters of the electron flow, which will improve the quality of optical elements.

The use of combined electron-beam treatment leads to improved surface of thin films (increased structure homogeneity and reduced microdefects, reduced average surface roughness, thin films obtained by the basic technology have more zones with high mechanical stresses, compared to thin films obtained by the technology obtained). It is established that after electron beam processing the sensitivity of the elements of PPR devices increases 1.7 times.

The results of the work have found practical application in domestic and foreign enterprises.

Keywords: thin films, qualitative characteristics of optical elements, combined electron-beam technology, electron-beam gun.